Research Article

Iranian Journal of Wood and Paper Industries
Vol. 16, No. 4, Page 547 - 562 (2026)

DOI: 10.22034/ijwp.2025.2069658.1722

The Effect of Nanographene, Fluorine, and Zein as Coating Pigments on the Physical and Mechanical Properties of Printing Paper

Jafar Ebrahimpour Kasmani[1*], Ahmad Samariha[2], Mohammad Farsi[3]

1- Corresponding author, Department of Wood and Paper, Sava.C., Islamic Azad University, Savadkooh, Iran. Email: kasmani@iau.ac.ir
2- Department of Engineering Sciences, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran
3- Department of Wood and Paper, Sari.C., Islamic Azad University, Sari, Iran

Received: August 2025 Accepted: October 2025

Abstract

Problem definition and objectives: The writing produced by the Mazandaran Wood and Paper Company is typically used for book printing. While foreign writing papers benefit from high strength due to the use of chemical pulp, domestic writing papers face challenges in terms of strength and dimensional stability due to the use of substandard raw materials. This research aims to leverage nanotechnology and mineral coatings, such as fluorine, which are abundantly available in certain regions of the country. The primary objective of this study is to address the physical and mechanical issues of domestic writing papers, enabling the products from this factory to be offered to printing houses and reputable printing companies within the country with enhanced quality.

Methodology: For this purpose, 70-gram writing paper was prepared and tested. To coat the paper surface, graphene, zein, and fluorine, along with styrene-butadiene latex, were separately weighed in specified weight percentages. Depending on the treatment conditions, these materials were mixed in a blender at 1500 RPM for 20 minutes to obtain a homogeneous mixture. Before conducting the tests, both control and coated samples were placed in standard environmental conditions (20 degrees Celsius and 65% relative humidity). To determine the physical and mechanical properties of the papers, a minimum of 10 repetitions for each sample were conducted according to standard methods.

Results: The physical property of density shows that the highest values are associated with papers coated with zein. The lowest absorption rates are found in papers coated with zein and nanographene, while the lowest porosity is observed in papers coated with zein, fluorine, and nanographene. These results indicate the formation of a dense network and a significant blockage of water passage by these coating materials. In terms of surface smoothness, the highest values are attributed to zein and nanographene papers, which is due to the two-dimensional structure and high specific surface area of nanographene. Finally, the greatest resistance to tensile stress, bursting, and tearing is found in papers coated with fluorine-graphene and zein-graphene, respectively. In fact, nanographene, as a reinforcing material with a regular and resilient structure, can enhance the mechanical properties of the paper. These findings highlight the superior performance of papers coated with zein and nanographene.

Conclusion: The results indicated that coating led to an increase in thickness and surface smoothness, a decrease in water absorption, porosity, and tensile strength, as well as a relative increase in tear resistance. The most significant finding was a 643% reduction in water absorption.

In addition to the decreased water absorption, coating the printing paper with nanographene and fluorine resulted in a 26% increase in thickness and tear resistance index compared to the control samples. Moreover, no significant change was observed in burst resistance; however, the tensile resistance index experienced a slight decrease.

Keywords: Coating, Graphene, Protein zein, Physical Properties, Mechanical Properties

تأثیر نانوگرافن، فلورین و زئین به عنوان رنگدانه‌های پوشش‌دهی بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذ چاپ و تحریر

جعفر ابراهیم پور کاسمانی[۱*]، احمد ثمریها[۲]، محمد فارسی[۳]

۱- نویسنده مسئول، گروه چوب و کاغذ، واحد سوادکوه، دانشگاه آزاد اسلامی، سوادکوه، ایران، رایانامه: kasmani@iau.ac.ir
۲- گروه علوم مهندسی، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران
۳- گروه چوب و کاغذ، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

تاریخ دریافت: شهریور ۱۴۰۴ تاریخ پذیرش: آبان ۱۴۰۴

چکیده

بیان مساله و اهداف: کاغذهای تحریر تولیدی شرکت چوب و کاغذ مازندران به‌طور معمول برای چاپ کتاب‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالی که کاغذهای تحریر خارجی به‌دلیل استفاده از خمیر شیمیایی از مقاومت بالایی برخوردارند، کاغذهای تحریر داخلی به‌خاطر به‌کارگیری مواد اولیه نامناسب با مشکلاتی در زمینه استحکام و ثبات ابعادی مواجه هستند. این تحقیق به دنبال بهره‌گیری از فناوری‌های نانو و پوشش‌های معدنی فلورین است که در برخی مناطق کشور به وفور یافت می‌شود. هدف اصلی این پژوهش کاهش مشکلات فیزیکی و مکانیکی کاغذهای تحریر داخلی است، به‌طوری‌که کاغذهای تولیدی این کارخانه با کیفیت بالاتری به چاپخانه‌ها و شرکت‌های معتبر چاپ در داخل کشور عرضه گردد.

مواد و روشها: برای این منظور، کاغذ چاپ و تحریر ۷۰ گرمی تهیه و مورد آزمون قرار گرفت. برای اندود سطح کاغذ، ابتدا نانوگرافن، زئین و فلورین به همراه لاتکس استایرن–بوتادی ان با درصدهای وزنی مشخص به‌طور جداگانه توزین شدند. بسته به شرایط تیمار، این مواد در داخل دستگاه مخلوط‌کن با دور گردش ۱۵۰۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه ترکیب شدند تا یک مخلوط همگن به‌دست آید. قبل از انجام آزمون‌ها، نمونه‌های شاهد و پوشش‌داده‌شده در شرایط محیطی استاندارد (دمای ۲۰ درجه سلسیوس و رطوبت نسبی ۶۵٪) قرار گرفتند. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذها، از حداقل ۱۰ تکرار برای هر نمونه بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد استفاده شد.

نتایج: در مورد خاصیت فیزیکی دانسیته، بالاترین مقدار مربوط به کاغذهای پوشش‌داده شده با زئین است. کمترین میزان جذب مربوط به کاغذهای پوشش داده شده با زئین و نانوگرافن و کمترین تخلخل مربوط به کاغذهای پوشش‌داده شده با زئین، فلورین و نانوگرافن است. این نتایج نشان دهنده ایجاد یک شبکه متراکم و مسدود شدن قابل توجه مسیر عبور آب توسط این مواد پوششی است. از نظر صافی سطح، بیشترین مقدار به کاغذهای زئین و نانوگرافن اختصاص دارد که به دلیل ساختار دو بعدی و سطح ویژه بالای نانوگرافن می‌باشد. در نهایت، بیشترین مقاومت در برابر کشش، ترکیدن و پاره شدن به ترتیب مربوط به کاغذهای پوشش داده با فلورین–گرافن و زئین–گرافن است. در واقع نانوگرافن به عنوان یک ماده تقویت‌کننده با ساختاری منظم و مقاوم، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کاغذ کمک کند. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد برتر کاغذهای پوشش‌داده شده با زئین و نانوگرافن است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان داد که پوشش‌دهی باعث افزایش ضخامت و صافی سطح، کاهش جذب آب، تخلخل و مقاومت به کشش و افزایش نسبی مقاومت به پاره شدن گردید. مهم‌ترین یافته، کاهش ۶۴۳ درصدی جذب آب بود. علاوه بر کاهش جذب آب، پوشش‌دهی کاغذ چاپ و تحریر با مواد نانوگرافن و فلورین نسبت به نمونه شاهد باعث افزایش ۲۶ درصدی ضخامت و شاخص مقاومت به پاره‌شدن شد. همچنین تغییر خاصی در مقاومت به ترکیدن مشاهده نشد، اما شاخص مقاومت به کشش تا حدودی کاهش یافت.

واژه های کلیدی: پوشش‌دهی، گرافن، پروتئین زئین، خواص فیزیکی، مکانیکی

مقدمه

در دنیای امروز، کاغذ همچنان به عنوان یک جزء جدایی‌ناپذیر در صنایع مختلف، از بسته‌بندی و چاپ گرفته تا محصولات بهداشتی و نوشت‌افزار، ایفای نقش می‌کند. فرآیند پوشش‌دهی در کاغذسازی نقش حیاتی در ارتقاء کیفیت، کارایی و عملکرد آن دارد. این فرآیند با ایجاد لایه‌ای محافظ و بهبوددهنده بر روی سطح کاغذ، آن را در برابر عوامل مخرب محیطی مانند رطوبت، سایش و پارگی مقاوم‌تر می‌سازد [۱]. به طور کلی، فرآیند پوشش‌دهی با بهبود خواص کاغذ، امکان تولید محصولاتی با کیفیت بالا و متناسب با نیازهای مختلف را فراهم می‌کند و به ارتقای جایگاه صنعت کاغذ در بازار رقابتی امروز کمک شایانی می‌کند [۲]. کاغذ چاپ و تحریر یکی از رایج‌ترین و مرسوم‌ترین انواع کاغذ است که در مصارف گوناگون از جمله چاپ کتاب، روزنامه، مجله و کاتالوگ استفاده می‌شود [۳]. عمده کاغذهای تحریر موجود در بازار ایران از نوع اندود نشده هستند. این نوع کاغذها به دلیل بافت خاص خود، مناسب برای نوشتن و چاپ هستند. کاغذهای سفیدی مانند کاغذهای A4 و سایر کاغذهای پرمصرف نیز از جمله کاغذهای تحریر به حساب می‌آیند [۴]. این کاغذ دارای سطح بافت‌دار و چند قسمتی است. این ویژگی باعث می‌شود جوهر به راحتی جذب بافت کاغذ شود و کیفیت چاپ و ماندگاری آن افزایش یابد. در چاپ‌های رنگی، به ویژه با استفاده از دستگاه‌های جوهرافشان و افست، ممکن است به دلیل جذب بالای رنگ‌ها، شفافیت رنگ‌ها کاهش یابد. با این حال، کاغذ چاپ و تحریر به دلیل قدرت جذب بالا، گزینه مناسبی برای نوشتن است و خواندن متن را برای کاربران آسان‌تر می‌کند. [۵]. نانوگرافن به‌عنوان یک ماده نوآورانه در صنعت کاغذسازی شناخته می‌شود و می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی و حرارتی کاغذ را بهبود بخشد [۶]. کاربرد نانوگرافن در تولید کاغذ منجر به افزایش استحکام، کاهش وزن و بهبود مقاومت در برابر آب و آتش می‌شود [۷]. زئین، که پروتئین اصلی موجود در دانه ذرت است و حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد از کل پروتئین‌های ذرت را تشکیل می‌دهد، به‌دلیل خواص منحصر به‌فرد خود به‌طور فزاینده‌ای در صنعت کاغذسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۸]. این پروتئین به‌عنوان یک ماده افزودنی طبیعی، به بهبود استحکام و مقاومت کاغذ کمک کرده و می‌تواند منجر به کاهش استفاده از مواد شیمیایی سنتزی در فرآیند تولید کاغذ شود [۹]. پوشش‌های رنگی در صنعت کاغذ، به‌ویژه در تولید کاغذهای چاپ و تحریر، نقش کلیدی دارند. این پوشش‌ها کیفیت چاپ، رنگ و شفافیت را بهبود می‌بخشند و همچنین مقاومت کاغذ را در برابر عوامل محیطی افزایش می‌دهند [۱۰]. استفاده از پوشش‌های رنگی موجب افزایش ماندگاری و کیفیت چاپ، به‌ویژه در چاپ‌های رنگی، می‌شود. نانوگرافن، زئین و فلورین به‌عنوان پوشش‌های نوین، به بهبود خصوصیات فیزیکی کاغذ و افزایش جذب جوهر و مقاومت در برابر رطوبت کمک می‌کنند [۱۱]. فلورین به‌عنوان یک عنصر کلیدی در بهبود خواص آب‌گریزی و مقاومت به رطوبت کاغذ شناخته می‌شود و به‌طور قابل‌توجهی عملکرد کاغذ در کاربردهای خاص را ارتقاء می‌دهد [۱۲]. استفاده از ترکیبات فلورینه در پوشش‌دهی کاغذ، خاصیت ضد لک و دوام آن را در برابر عوامل محیطی بهبود می‌بخشد [۱۳].

Parris و همکاران (۲۰۰۲) در تحقیق خود به بررسی بازیافت کاغذ و مقوای لاینر کرافت پوشش داده شده با زئین پرداختند. آن‌ها خواص مقاومتی، مقاومت در برابر بخار آب و روغن را اندازه‌گیری کردند و دریافتند که پوشش‌دهی می‌تواند نرخ انتقال بخار آب و نفوذ چربی را به میزان ۱۶۱ و ۱۰۰ درصد کاهش دهد. خواص مقاومتی کاغذ پوشش‌داده شده با زئین ۱۲ تا ۱۹ درصد کمتر از کاغذ شاهد بدون پوشش بود [۱۴]. Tihminlioglu و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی اثر فیلم‌های پلی پروپیلن پوشش‌داده شده با زئین پرداختند. نتایج آنها نشان داد که پوشش زئین موجب بهبود ممانعت بخار آب و اکسیژن می‌شود. میزان انتقال اکسیژن در نمونه‌های پوشش‌داده شده با زئین به طور قابل‌توجهی کمتر از نمونه‌های بدون پوشش بود [۱۵]. نظرنژاد و همکاران (۱۴۰۲) نیز به بررسی اثر پوشش‌دهی با زئین ذرت پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت نرم‌کننده تأثیر مثبتی بر

مقاومت به عبور هوا و روغن دارد، اما بر جذب آب تأثیر منفی دارد [۱۶].

Ashfaq و همکاران (۲۰۱۹) به بررسی تأثیر نانوگرافن بر خواص فیلم‌های پلیمر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزودن نانوگرافن به فیلم‌های پوشش‌داده شده موجب بهبود ممانعت بخار آب و اکسیژن می‌شود. میزان انتقال اکسیژن در نمونه‌های حاوی نانوگرافن به طور قابل‌توجهی کمتر از نمونه‌های بدون نانوگرافن بود [۱۷]. Chen و همکاران (۲۰۲۵) به بررسی توسعه افزودنی‌های کاغذی مبتنی بر فلورین پرداختند که بهبود همزمان استحکام و مقاومت در برابر آب را فراهم می‌آورد. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این افزودنی‌ها می‌تواند به طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی و عملکرد کاغذ را ارتقا دهد [۱۸].

با توجه به اینکه فرآیندهای مختلفی بر روی کاغذ انجام می‌شود، کاغذ باید دارای مقاومت و استحکام مناسبی باشد. کاغذهای تحریر خارجی به دلیل استفاده از خمیر شیمیایی، مقاومت بالایی دارند، اما کاغذهای تحریر داخلی به دلیل استفاده از مواد اولیه نامناسب، مشکلاتی در استحکام و ثبات ابعادی دارند [۱۹]. این تحقیق به دنبال استفاده از فناوری‌های نانو و پوشش‌های معدنی فلورین است که در مناطق خاصی از کشور به وفور یافت می‌شود. در این تحقیق به دنبال آن هستیم با فناوری‌های جدید نانو، با استفاده از پوشش‌های پروتئینی و معدنی، مشکلات فیزیکی و مکانیکی این کاغذها را کاهش داده و کاغذهای تحریر تولیدی این کارخانه با کیفیت مناسبتر در اختیار چاپخانه ها و شرکت معتبر چاپ داخل کشور قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

کاغذ چاپ و تحریر مورد استفاده در این مطالعه با ترکیب ۳۰ درصد غان، ۳۰ درصد صنوبر و ۴۰ درصد مخلوط گونه‌ها از کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه شد. گراماژ این کاغذ ۷۰ گرم بر متر مربع و ضخامت آن ۹۵ میکرون بود.

نانوگرافن نوع AO-4 از شرکت گرافن سوپرمارکت ایالات متحده آمریکا خریداری شد. این پودر دارای سطح ویژه‌ای بیشتر از ۱۵ مترمربع بر گرم و سیاه رنگ است. خلوص آن ۹۹/۵ درصد است و ضخامت متوسط آن به ۶۰ نانومتر می‌رسد. همچنین، قطر ذرات نانوگرافن بین ۳ تا ۱۸ نانومتر متغیر است و مساحت سطح آن ۳۰۰ متر مربع بر گرم می‌باشد.

پروتئین زئین از شرکت سیگما آلدریچ خریداری شد. این پروتئین دارای وضعیت ظاهری زرد رنگ و درصد وزنی پروتئین خام آن ۵۵ درصد می‌باشد. همچنین، درصد وزنی فیبر خام آن ۱۰ درصد و درصد وزنی خاکستر ۳ درصد است. میزان اوره در این پروتئین منفی گزارش شده است.

فلورین از گروه تولیدی معدن کاوان با مشخصاتی نظیر مقدار کاهش وزن بر اثر احتراق[1] برابر با ۰/۵ درصد است. همچنین، محتوای دی اکسید تیتانیوم[2]کمتر از ۰/۰۱ درصد، و کلسیم فلوراید[3]۹۶/۱۳ درصد تهیه شد.

رزین بر پایه آکریل آمید (SH-305) با مشخصاتی نظیر شکل ظاهری: مایع شیری رنگ، نوع: خود اتصال عرضی[4] خاصیت امولسیونی: آنیونیک، درصد مواد جامد: ۵۰٪، pH : ۸-۶، Tg : ۲- °C ، گرانروی: cp ۱۰۰۰۰ از شرکت سیماب رزین تهیه شد.

چسب پلی‌وینیل استات از شرکت چسب و رزین شمال تهیه شده است. این چسب دارای رنگ شیری و وضعیت ظاهری مایع است. خاصیت امولسیونی آن آنیونیک است. درصد مواد جامد در این چسب ۵۰ درصد می‌باشد و pH آن بین ۶ تا ۸ است. همچنین، دمای انتقال شیشه‌ای آن ۲- درجه سلسیوس و گرانروی آن ۱۰،۰۰۰ سانتی‌پوآز است.

پراکنده‌ساز که رنگ آن نارنجی زرد بوده و درصد مواد جامد آن ۴۲ درصد است. همچنین، pH این پراکنده‌ساز برابر با ۷/۵ می‌باشد، از شرکت سیماب رزین تهیه شد.

نشاسته کاتیونی حاصل از گیاه تاپیوکا با مشخصاتی نظیر خاصیت امولسیونی آن کاتیونیک، pH آن برابر با ۶ و همچنین، درصد پروتئین موجود در آن کمتر از ۱ درصد و محتوای نیتروژن آن ۰/۲۵درصد از کارخانه چوب و کاغذ مازندران تهیه شد.

---

[1] LOI (Loss on Ignition)

[2] TiO_2

[3] CaF_2

[4] Self - crosslink

مرکب چاپ فلکسوگرافی S با رنگ ارغوانی در حلال‌های ایزوپروپانول و اتیل استات به نسبت ۱ به ۲ تا ۱ به ۳ از شرکت بهروفران تهیه گردید.

پوشش‌دهی کاغذ پایه

جهت پوشش‌دهی، ابتدا نانوگرافن، زئین و فلورین به طور جداگانه توزین شدند. بسته به شرایط تیمار، هر یک از این مواد پوشش‌دهی به صورت مجزا و ترکیبی به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد با ۱۰۰ گرم آب مقطر مخلوط گردیدند. سپس با افزودن ۲/۵ گرم لاتکس استایرن بوتادین و ۰/۵ گرم پراکنده‌ساز، به مدت ۲۰ دقیقه مجدداً در داخل دستگاه مخلوط‌کن با دور گردش ۱۵۰۰ rpm ترکیب شدند تا یک مخلوط همگن به دست آید. در انتها، نشاسته کاتیونی به غلظت ۵ درصد به عنوان یک کمک نگهدارنده برای افزایش پوشش و دستیابی به توزیع یکنواخت‌تر ذرات بر روی سطح کاغذ، به این ترکیب‌ها اضافه شد و عمل هم‌زدن ادامه یافت. مخلوط‌ها همگن شده و با استفاده از یک همزن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شدند. محلول‌های پوششی آماده‌شده با استفاده از دستگاه اندودکننده روی ورق‌های کاغذ اعمال شدند. حجم ۲۷ میلی‌لیتر از محلول پوشش از یک طرف بر روی کاغذ ریخته شد و یک میله اپلیکاتور بلافاصله در طول صفحات کاغذ جارو شد. سرعت پوشش روی ۲۵ میلی‌متر بر ثانیه تنظیم گردید. ورق‌های کاغذ پوشش داده‌شده در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت در هوا خشک شدند. کدها و درصدهای خاص ترکیبات مورد استفاده در پوشش‌ها و تیمارها در جدول ۱ خلاصه شده است. قبل از تعیین مشخصات، همه نمونه‌ها در دمای ۱±۲۰ درجه سانتی‌گراد با رطوبت نسبی ۶۵ درصد به مدت حداقل ۲۴ ساعت و طبق استاندارد ISO 187 قرار گرفتند.

جدول ۱- کدها و شرایط تیمارها

ردیف	کد	توضیحات
۱	CWL	لاینر سفید شاهد
۲	WLG	لاینر سفید پوشش دهی شده با نانوگرافن
۳	WLZ	لاینر سفید پوشش دهی شده با زئین
۴	WLF	لاینر سفید پوشش دهی شده با فلورین
۵	WLZG	لاینر سفید پوشش دهی شده با نانوگرافن و زئین
۶	WLFG	لاینر سفید پوشش دهی شده با نانوگرافن و فلورین
۷	WLFZ	لاینر سفید پوشش دهی شده با فلورین و زئین
۸	WLZFG	لاینر سفید پوشش دهی شده با نانوگرافن و زئین و فلورین

اندازه‌گیری خواص کاغذ

برای تعیین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی کاغذها، حداقل ۱۰ تکرار برای هر نمونه بر اساس دستورالعمل‌های استاندارد استفاده شد. خواص مورد آزمون کاغذهای دست‌ساز شامل ضخامت طبق استاندارد (T411 om-89)، دانسیته طبق استاندارد (T410 om-02)، جذب آب طبق استاندارد (T441 om-96)، تخلخل طبق استاندارد (T460 om-02)، صافی سطح آب طبق استاندارد (T479 cm-21)، شاخص مقاومت در برابر کشش طبق استاندارد (T404 om-92)، شاخص مقاومت در ترکیدن طبق استاندارد (T403 om-02)، شاخص مقاومت در برابر پاره شدن طبق استاندارد (T404 om-04)، اندازه‌گیری شد.

محاسبات آماری

طرح آزمایشی مورد استفاده در این تحقیق، از نوع تجزیه واریانس یک طرفه و جهت پردازش نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌ها از نرم‌افزار SPSS (نسخه ۲۳) استفاده شد. به‌منظور تجزیه و تحلیل داده‌ها از تجزیه واریانس یک طرفه و جهت مقایسه میانگین‌ها از آزمون دانکن در سطح اعتماد ۹۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

برای بررسی اختلاف آماری بین میانگین خواص مورد بررسی، از آزمون تجزیه واریانس استفاده شد. نتایج شامل مقدار F به‌دست‌آمده از این آزمون و سطح معنی‌داری در جدول ۲ ارائه شده است.

نتایج آنالیز واریانس یک‌طرفه نشان داد که بین مقادیر ضخامت، دانسیته، جذب آب، تخلخل، صافی سطح و شاخص‌های مقاومت در برابر کشش، پاره شدن و ترکیدن در هشت نوع کاغذ مورد آزمون، در سطح احتمال ۵ درصد اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۲- تجزیه واریانس (مقدار F و سطح معنی‌داری) اثر متغیرهای ساخت بر خواص فیزیکی و مقاومت‌ها

ضخامت (میکرون)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۵۷۲۸/۹۵۸	۸۱۸/۴۲۳	۴۰/۰۸۶	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۳۲۶/۶۶۷	۲۰/۴۱۷		
کل	۲۳	۶۰۵۵/۶۲۵			
دانسیته (گرم بر سانتی‌متر مکعب)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۰/۰۸۸	۰/۰۱۳	۹/۵۶۸	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۰/۰۲۱	۰/۰۰۱		
کل	۲۳	۰/۱۰۹			
جذب آب (گرم بر متر مربع)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۳۰۰۵/۲۸۷	۴۲۹/۳۲۷	۲۲۲۰/۷۵۱	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۳/۰۹۳	۰/۱۹۳		
کل	۲۳	۳۰۰۸/۳۸۰			
تخلخل (ثانیه)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۲۷۸۴۹۳۸۶/۹۷۲	۳۹۷۸۴۸۳/۸۵۳	۴۴۳۶۹۷۰/۸۴۰	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۱۴/۳۴۷	۰/۸۹۷		
کل	۲۳	۲۷۸۴۹۴۰۱/۳۱۸			
صافی سطح (میلی‌لیتر در دقیقه)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۷۰/۴۴۳	۱۰/۰۶۳	۹۳/۹۷۶	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۱/۷۱۳	۰/۱۰۷		
کل	۲۳	۷۲/۱۵۶			
شاخص مقاومت در برابر کشش (میلی کیلو نیوتن بر متر)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۲۲۳۴/۹۹۰	۳۱۹/۲۸۴	۱۳/۳۹۲	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۳۸۱/۴۶۴	۲۳/۸۴۱		
کل	۲۳	۲۶۱۶/۴۵۴			
شاخص مقاومت در برابر ترکیدن (کیلوپاسکال متر مربع بر گرم)					
منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۱/۰۰۹	۰/۱۴۴	۷/۵۴۴	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۰/۳۰۶	۰/۰۱۹		
کل	۲۳	۱/۳۱۴			
شاخص مقاومت در برابر پاره شدن (میلی نیوتن متر مربع بر گرم)					

منبع	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	F محاسباتی	سطح معنی‌داری
بین گروه‌ها	۷	۸۶۹/۶۲۵	۱۲۴/۲۳۲	۹/۸۴۰	۰/۰۰۰
درون گروه‌ها	۱۶	۲۰۲/۰۰۰	۱۲/۶۲۵		
کل	۲۳	۱۰۷۱/۶۲۵			

سطح معنی داری: * ۹۵٪، ns: عدم معنی داری

ترکیبات پوششی بر روی سطح کاغذ منجر به افزایش ضخامت شد.

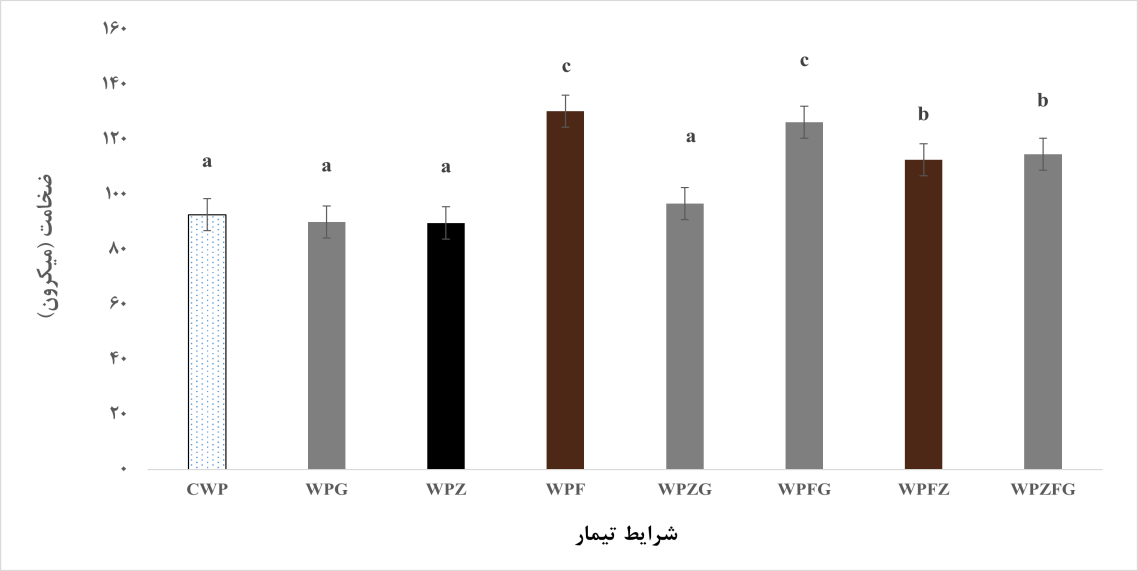
ضخامت

بیشترین میزان ضخامت مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با فلورین برابر ۱۳۰/۳۳ میکرون است و کمترین میزان آن متعلق به نمونه پوشش داده شده با زئین برابر ۸۹/۶۷ میکرون است (شکل ۱).

در بررسی ضخامت کاغذها، تفاوت‌های معناداری مشاهده شد که می‌توان به تغییرات قابل توجه ضخامت کاغذ پایه در پروفیل عرضی آن اشاره کرد. باقی ماندن

این رسوب موجب شکل‌گیری یک لایه پوشش می‌شود که ضخامت این لایه تحت تأثیر نوع پلیمر و مقدار مواد جامد محلول در پوشش قرار دارد [۲۰].

بر اساس مطالعات انجام‌شده بر روی کاغذهای پوشش‌داده‌شده، مشخص شده است که پوشش، به‌ویژه با ذرات فلورین، ساختاری با چگالی بیشتر ایجاد می‌کند. همچنین، گستردگی زیاد دامنه ضخامت کاغذ پایه باعث بروز تفاوت‌های قابل‌توجه در ضخامت کاغذهای پایه شده است.

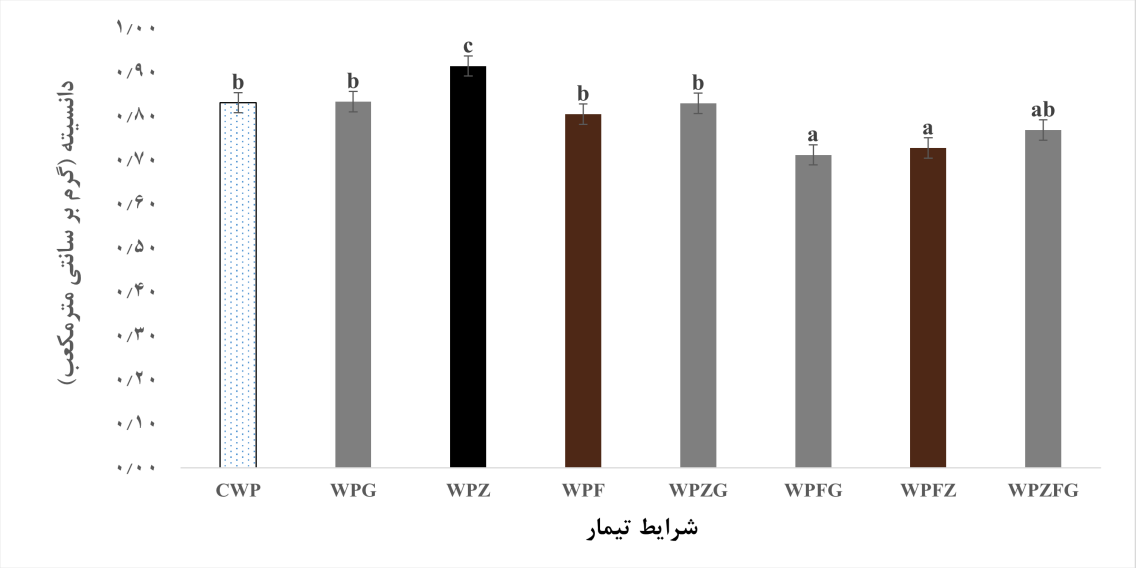


شکل ۱- مقایسه میانگین ضخامت کاغذهای مختلف

دانسیته

بیشترین میزان دانسیته مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین برابر ۰/۹۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و کمترین میزان آن متعلق به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با فلورین و نانوگرافن برابر ۰/۷۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است (شکل ۲).

افزایش دانسیته در کاغذهای پوشش داده شده با زئین به دلیل تشکیل لایه متراکم و خاصیت آب‌گریزی آن است، در حالی که کاهش دانسیته در کاغذهای پوشش داده شده با فلورین و نانوگرافن به دلیل ساختار نانوگرافن و احتمال وجود تخلخل بیشتر است [۲۱].



شکل ۲- مقایسه میانگین دانسیته کاغذهای مختلف

جذب آب

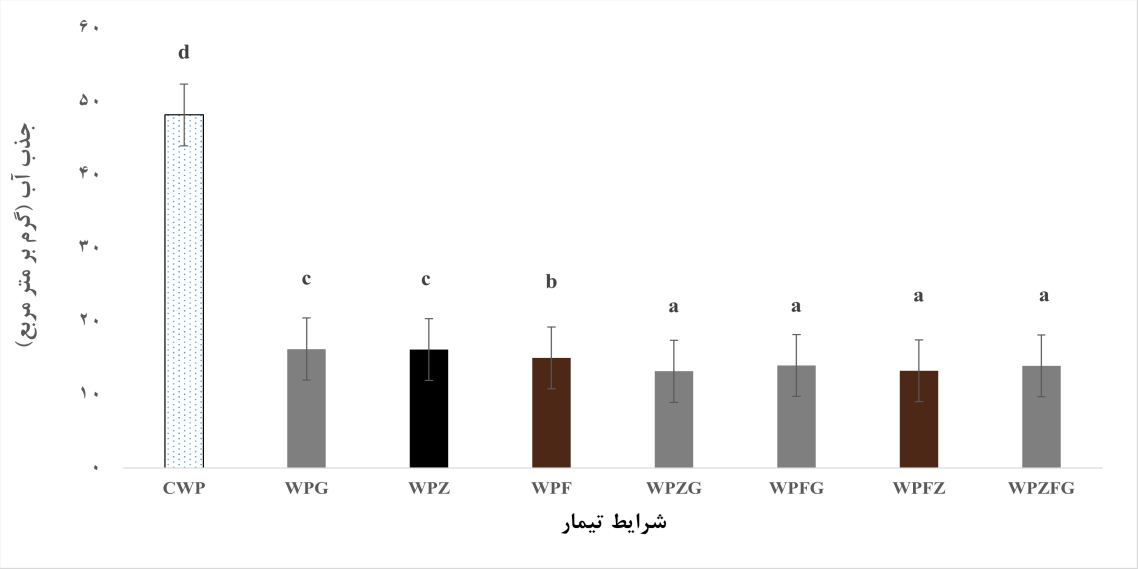
کمترین میزان جذب آب مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین و نانو گرافن برابر ۱۳/۱۸ گرم بر متر مربع است و بیشترین میزان آن متعلق به نمونه‌های شاهد برابر ۴۸/۲۰ گرم بر متر مربع است (شکل ۳).

لایه پوششی با پوشاندن خلل و فرج سطح کاغذ و ایجاد یک لایه یکپارچه، نفوذ مولکول‌های آب را کندتر می‌کند. این موضوع را می‌توان به مقاومت به آب بالاتر نانوگرافن مرتبط دانست. در حقیقت، وارد کردن نانوگرافن به ساختار ماتریس پوشش و لایه اندودکننده کاغذ، مسیر عبور مولکول‌های آب را پرپیچ و خم‌تر و طولانی‌تر می‌کند. مکانیسم عمل نانوگرافن به طور خاص به دلیل ساختار دو بعدی و سطح ویژه بالای آن، اجازه می‌دهد که این ماده به طور مؤثرتری در پوشش‌ها عمل کند. مقایسه نتایج حاصل از اندازه‌گیری نفوذپذیری به آب با نتایج مطالعات پیشین مطابقت دارد [۲۲-۱۹].

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از نانوگرافن در ترکیبات پلیمر سبب کاهش چشمگیر نفوذپذیری آب می‌شود، زیرا این نانوذرات با ایجاد یک شبکه متراکم، مسیر عبور آب را به طور قابل توجهی مسدود می‌کنند. این کاهش نفوذ در اثر حضور نانوذرات را می‌توان به مسیرهای پیچشی و غیرمستقیم عبور مولکول‌های آب مرتبط دانست. ابعاد بسیار ریز نانوذرات، فضاهای خالی بستر پوشش متخلخل را پر می‌کند که در نتیجه این امر، پوشش ایجاد شده، رطوبت یا آب را به سختی منتقل می‌کند [۲۳].

قابل ذکر است که هر چه تخلخل بین الیاف کاغذ کاهش یابد، به دلیل کاهش نسبی فضاهای بین الیافی کاغذ، جذب آب نیز کاهش می‌یابد. با جذب مواد پوششی بر سطح کاغذ و برقراری پیوند بین مواد پوششی و الیاف کاغذ، علاوه بر محصور و منفعل نمودن گروه‌های آبدوست سطح کاغذ، نانوگرافن به درون منافذ کاغذ نیز نفوذ کرده و افزایش حضور این مواد در درون کاغذ، موجب بسته و مسدود شدن تمام خلل و فرج کاغذ و کاهش جذب آب می‌شود.

میزان جذب آب در نمونه‌های پوشش‌داده‌شده با نانوگرافن کمتر از نمونه‌های بدون پوشش است که می‌توان آن را به کوچک بودن ابعاد نانوذرات و در نتیجه سطح ویژه بیشتر نسبت داد. این ذرات راحت‌تر در خلل و فرج موجود در بین الیاف قرار می‌گیرند و در نتیجه با پر کردن این خلل و فرج، باعث کاهش میزان جذب آب نسبت به نمونه‌های بدون پوشش می‌شوند. همچنین، در طی فرآیند پوشش‌دهی میزان دسترسی آب به الیاف و تشکیل پیوند هیدروژنی با گروه‌های عاملی موجود در الیاف نیز کاهش می‌یابد و موجب کاهش جذب آب خواهد شد.



شکل ۳- مقایسه میانگین جذب آب کاغذهای مختلف

تخلخل

کمترین میزان تخلخل مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین، فلورین و نانو گرافن برابر ۹۴/۲۷ ثانیه است و بیشترین میزان آن متعلق به نمونه شاهد برابر ۳۴۷۶ ثانیه است (شکل ۴).

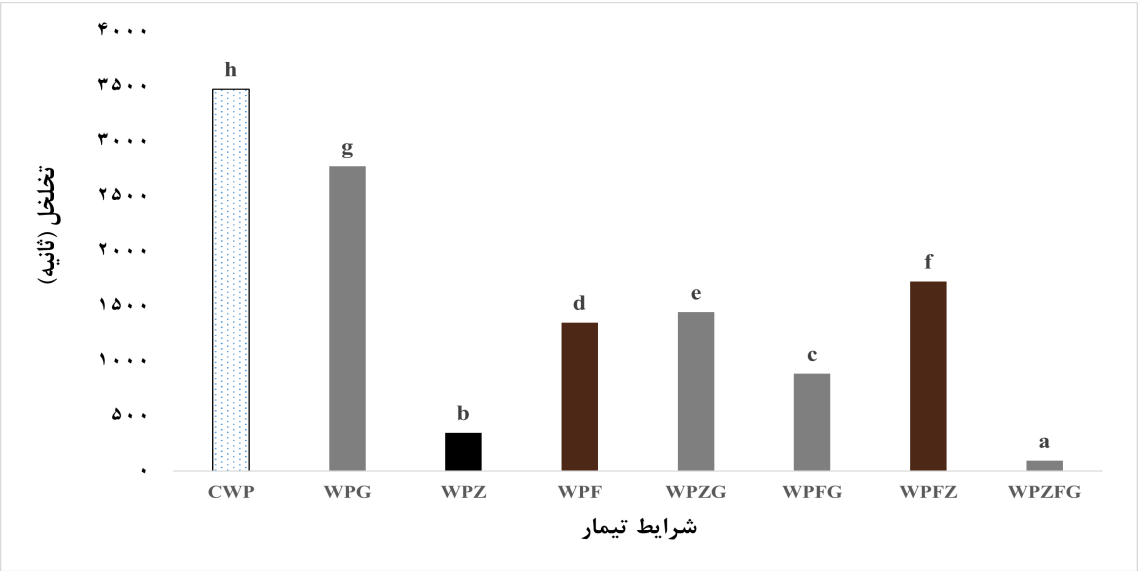
تخلخل یکی از مهم‌ترین شاخص‌های کاغذ است که نقش بسزایی در حفظ کیفیت آن دارد. حضور لایه پوششی بر روی سطح کاغذ و انسداد خلل و فرج ساختار آن، مسیرهای عبور و انتقال مولکول‌های هوا را کاهش می‌دهد و به این ترتیب، مقاومت کاغذ در برابر عبور هوا افزایش می‌یابد. نتایج مشابهی در سایر پژوهش‌ها نیز گزارش شده است [۱۹-۲۴].

تخلخل کاغذها نشان داد که با پوشش‌دهی، مقاومت به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه نقش مواد پوششی در محلول پوشش، ایجاد یک فیلم یکنواخت‌تر است، افزایش مقدار این مواد در محلول پوشش، ضمن ایجاد یک فیلم یکنواخت و انعطاف‌پذیر، به کاهش تخلخل کمک می‌کند [۲۵]. در نتیجه، کاغذ پوشش‌داده‌شده با ترکیب نانوگرافن، زئین و فلورین، موجب کاهش بیشتر تخلخل کاغذ شد.

همچنین، تیمن لایگلو (۲۰۱۰) در پژوهشی بر روی کاغذ پوشش‌داده‌شده با زئین و نرم‌کننده به نتایج مشابهی دست یافت [۱۵].

تخلخل با افزایش ضخامت پوشش به میزان قابل‌توجهی کاهش یافت. کاهش شدید تخلخل در کاغذهای پوشش‌داده‌شده حاوی مواد پوششی را می‌توان به عواملی مانند کاهش ابعاد مواد پوششی و افزایش سطح ویژه آن‌ها نسبت داد. کاهش قطر و افزایش سطح ویژه مواد پوششی، به‌ویژه نانوگرافن، منجر به تشکیل ساختاری متراکم‌تر و ایجاد سطح پیوند گسترده‌تر در ساختار کاغذ نسبت به نمونه شاهد می‌شود. اجزای اصلی در پوشش‌ها، ساختارهای نفوذناپذیری هستند که مولکول‌های هوا برای عبور از بین آن‌ها باید مسیرهای پیچیده‌تری را طی کنند [۲۶].

اعتقاد بر این است که ساختار بلوری نانوگرافن نقش مهمی در بهبود خواص ممانعتی دارد و می‌تواند به‌عنوان یک راهکار مؤثر در کاهش تخلخل کاغذها مورد استفاده قرار گیرد [۲۷].



شکل ۴- مقایسه میانگین تخلخل کاغذهای مختلف

صافی سطح

کمترین میزان صافی سطح مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با فلورین برابر ۵/۱۷ میلی‌لیتر در ثانیه است و بیشترین میزان آن متعلق به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین و گرافن برابر ۱۰/۶ میلی-لیتر در ثانیه است (شکل ۵). استفاده از مواد پوششی در برخی تیمارها، افزایش معنی‌دار صافی را به همراه داشته است. بهبود اتصال الیاف در سطح کاغذ و کاهش منافذ و ناصافی‌های سطح کاغذ، به همراه تشکیل لایه فیلم بر روی الیاف و کاغذ، موجب افزایش صافی در این تیمارها می‌شود.

نانوگرافن به دلیل ساختار دو بعدی و سطح ویژه بالا، می‌تواند به طور مؤثری در بهبود صافی سطح کاغذ کمک کند. این ماده با پر کردن خلل و فرج موجود در سطح کاغذ و ایجاد یک لایه یکنواخت، به کاهش ناصافی‌ها و بهبود کیفیت نهایی کاغذ منجر می‌شود. زئین نیز به عنوان یک پلیمر طبیعی، به افزایش چسبندگی و یکدست شدن سطح کاغذ کمک می‌کند، در حالی که فلورین به دلیل خاصیت آب‌گریزی خود، می‌تواند سطح کاغذ را در برابر رطوبت مقاوم‌تر کند.

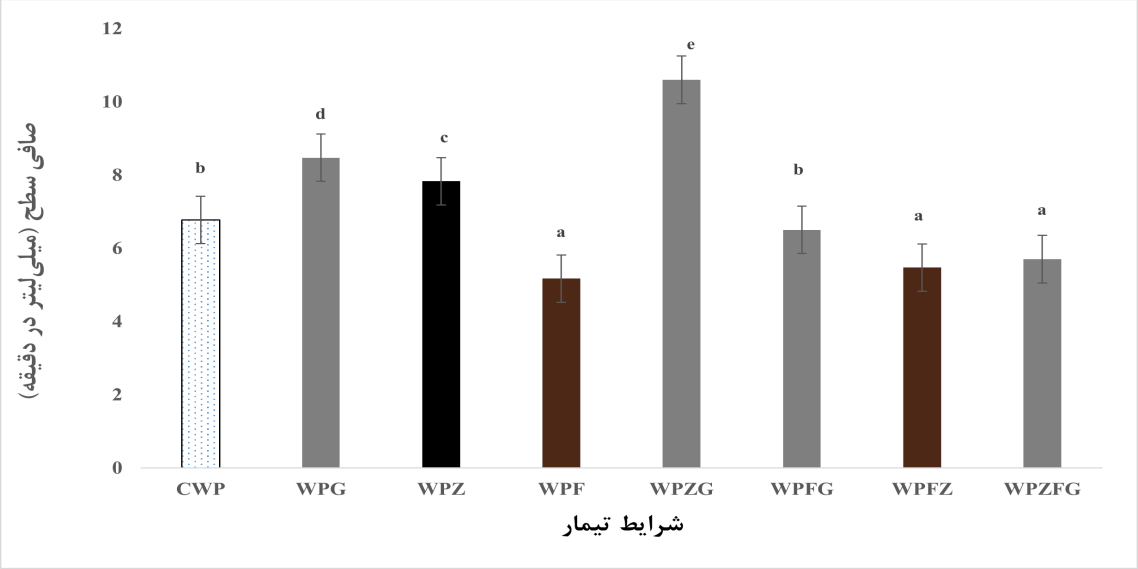
تحقیقات انجام شده توسط دیگر پژوهشگران نیز نشان می‌دهد که استفاده از نانوذرات در پوشش‌های کاغذی می‌تواند بهبود قابل توجهی در صافی سطح ایجاد کند [۲۸].

در نتیجه، بهبود صافی سطح کاغذهای پوشش‌داده‌شده با این ترکیبات، نه تنها کیفیت ظاهری کاغذ را افزایش می‌دهد، بلکه می‌تواند تأثیرات مثبتی بر ویژگی‌های مکانیکی و عملکردی آن‌ها نیز داشته باشد.

شاخص مقاومت در برابر کشش

بیشترین میزان شاخص مقاومت در برابر کشش مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با فلورین و گرافن برابر ۶۴/۰۲ میلی کیلونیوتن بر متر است و کمترین میزان آن متعلق به نمونه‌های کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین، فلورین برابر ۳۴/۳۴ میلی کیلونیوتن بر متر است (شکل ۶). شاخص مقاومت در برابر کشش به مقاومت بین الیاف و پیوندهای بین آن‌ها بستگی دارد. مهم‌ترین عامل مؤثر بر آن، نوع و میزان اتصال الیاف با یکدیگر است. کاهش اتصالات الیاف با یکدیگر، مقاومت کششی را کاهش می‌دهد.

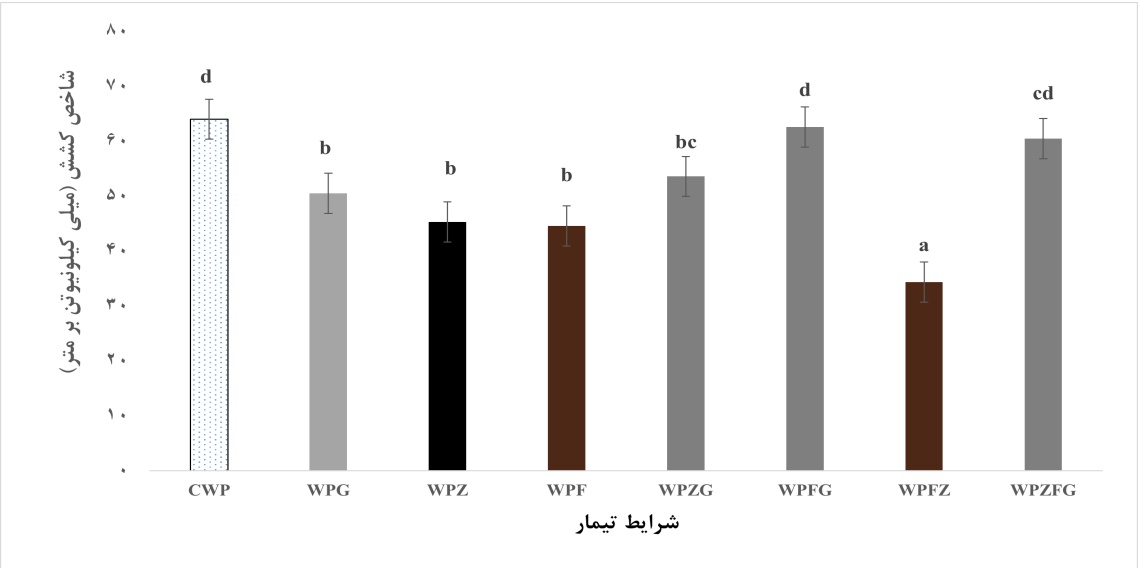
جذب بیش از حد مواد پوششی نیز می‌تواند به بروز حالت شکنندگی در کاغذ منجر شده و در نتیجه، مقاومت کششی را کاهش دهد. به نظر می‌رسد که پوششی شکننده ایجاد شده و این پوشش شکننده باعث افزایش فاصله بین مولکولی می‌شود. در واقع، این افزایش فاصله موجب کاهش شکنندگی، افزایش انعطاف‌پذیری و نفوذ مواد پوششی می‌گردد و در نتیجه، مقاومت کششی کاهش می‌یابد [۲۹].



شکل ۵- مقایسه میانگین صافی سطح کاغذهای مختلف

مواد پوششی علاوه بر بهبود انعطاف‌پذیری، قابلیت نفوذ مواد پوششی را نیز افزایش می‌دهند. در نتیجه، نفوذ بیشتر محلول پوششی، باعث کاهش مقاومت می‌شود. همان‌طور که در نمودار نشان داده شده است، مقاومت کششی کاغذ چاپ و تحریر بدون پوشش در برخی تیمارها به‌طور قابل توجهی بیشتر از کاغذ چاپ و تحریر پوشش‌داده‌شده است. کاهش مقاومت کششی ممکن است به دلیل نفوذ محلول پوشش در شبکه الیاف باشد که منجر به تورم الیاف سلولز و اختلال در اتصالات بین الیاف می‌شود [۳۰].

کاهش سهم فلورین و پروتئین زئین در فرمولاسیون پوشش، موجب افزایش میزان نفوذ مواد پوشش به داخل شبکه الیاف و کاهش بیشتر مقاومت کششی می‌شود، به‌ویژه هنگامی که زئین و فلورین به‌تنهایی یا به‌صورت ترکیبی استفاده شده‌اند. یکی دیگر از مقاومت‌ها که تابع مقاومت ذاتی الیاف و پیوند بین آن‌ها است، در نتیجه، نفوذ بیشتر محلول پوشش به داخل ساختار الیاف باعث کاهش مقاومت می‌شود. این فرآیند می‌تواند بر ویژگی‌های مکانیکی کاغذ تأثیر بگذارد و به تغییرات در عملکرد آن منجر شود [۳۱].



شکل ۶- مقایسه میانگین شاخص مقاومت در برابر کشش کاغذهای مختلف

نانوگرافن به عنوان یک ماده تقویت‌کننده می‌تواند مقاومت کششی و انعطاف‌پذیری کاغذ را افزایش دهد. در مقایسه با زئین و فلورین، نانوگرافن دارای خواص مکانیکی برجسته‌ای است که می‌تواند به بهبود ویژگی‌های کاغذ منجر شود. نتایج یافته‌های پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که استفاده از نانوگرافن در ترکیب با زئین و فلورین می‌تواند تأثیرات مثبت بیشتری بر روی ویژگی‌های مکانیکی کاغذ داشته باشد [۳۲].

به طور کلی، باید توجه داشت که استفاده از ترکیبات مختلف و بهینه‌سازی نسبت‌های آن‌ها می‌تواند به بهبود عملکرد کاغذ و کاهش شکنندگی آن کمک کند.

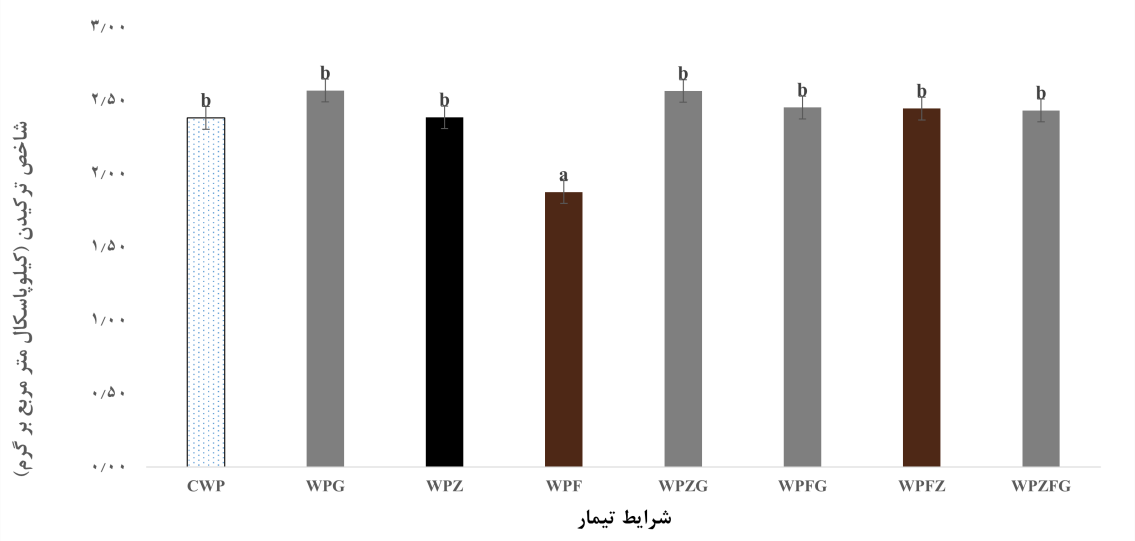
شاخص مقاومت در برابر ترکیدن

کمترین میزان شاخص مقاومت در برابر ترکیدن مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با فلورین برابر ۱/۸۸ کیلوپاسکال متر مربع بر گرم است و بیشترین میزان آن متعلق به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با نانو گرافن برابر ۲/۵۷ کیلوپاسکال متر مربع بر گرم است که تفاوت معنی‌داری بین سایر نمونه‌ها وجود ندارد (شکل ۷).

نانوگرافن به عنوان یک ماده تقویت‌کننده با ساختاری منظم و مقاوم، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی کاغذ کمک کند. این ماده به افزایش استحکام و کاهش شکنندگی کاغذ منجر می‌شود. در مقابل، پوشش فلورین ممکن است به دلیل ویژگی‌های خود، نتواند به خوبی در تقویت ساختار الیاف عمل کند و در نتیجه، مقاومت در برابر ترکیدن کاغذ را کاهش دهد.

نانوگرافن می‌تواند به عنوان یک مانع عمل کند و از نفوذ آب و رطوبت جلوگیری کند، که این امر می‌تواند به بهبود مقاومت کاغذ در برابر ترکیدن منجر شود. در حالی که پوشش فلورین ممکن است خاصیت آب‌گریزی داشته باشد، اما نتواند همانند نانوگرافن در تقویت ساختار کاغذ عمل کند.

نانوگرافن می‌تواند به بهبود تعاملات بین الیاف کمک کند و در نتیجه، پیوندهای الیاف را تقویت کند. این امر می‌تواند منجر به افزایش مقاومت در برابر ترکیدن شود [۳۳].



شکل ۷- مقایسه میانگین شاخص مقاومت در برابر ترکیدن کاغذهای مختلف

شاخص مقاومت در برابر پاره‌شدن

کمترین میزان شاخص مقاومت در برابر پاره شدن مربوط به کاغذ چاپ و تحریر پوشش داده شده با زئین و گرافن برابر ۳۸ میلی نیوتن متر مربع بر گرم است (شکل ۸). شاخص پارگی بیان‌کننده مقدار انرژی مورد نیاز برای گسیختگی نمونه کاغذ است. این انرژی ممکن است صرف پارگی الیاف یا جداسازی آن‌ها از صفحه کاغذی به‌دلیل گسستگی پیوند بین الیاف شود. اساساً، شاخص پارگی

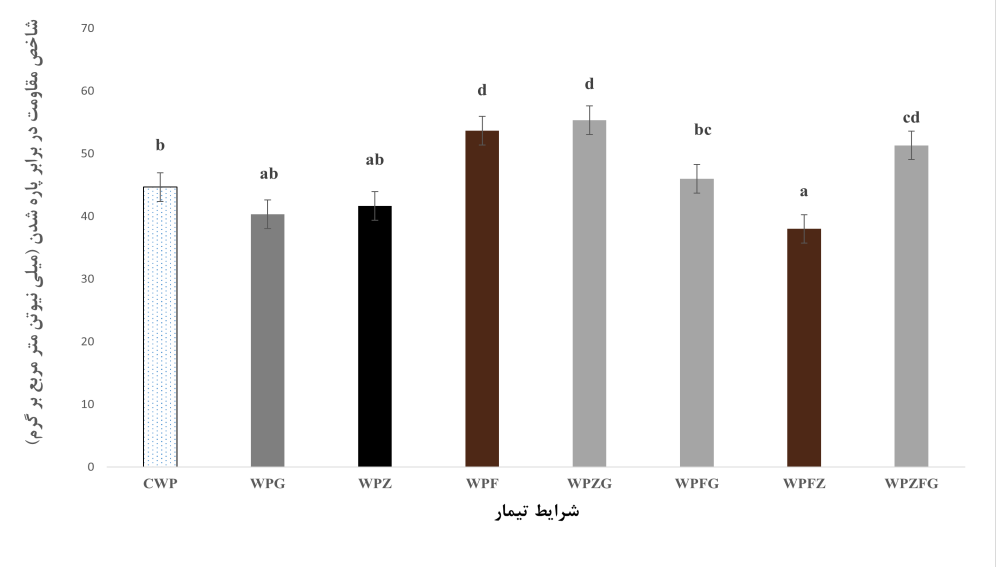
مقاومتی است که بیشتر تحت تأثیر طول الیاف قرار دارد تا پیوند هیدروژنی بین آن‌ها. به همین دلیل، دامنه نوسان بین کمترین و بیشترین مقدار آن، همان‌طور که مشاهده می‌شود، بسیار اندک است.

این شاخص به‌طور دقیق، کار لازم برای پاره کردن کاغذ در یک فاصله ثابت بعد از شروع پارگی را اندازه‌گیری می‌کند. قرار گرفتن یک لایه بر روی الیاف باعث افزایش ضخامت تک‌به‌تک الیاف و در نتیجه، افزایش مقاومت به پارگی کاغذ می‌شود. اما کاربرد مواد پوششی و افزایش جذب آن‌ها بر سطح کاغذ، شاخص پارگی را به دلیل تشکیل فیلم شکننده مواد بر سطح کاهش می‌دهد.

Kassamو همکاران (۲۰۰۹) جذب و نفوذ بیش از حد مواد بر سطح الیاف و در نتیجه سخت و شکننده شدن الیاف را دلیل کاهش شاخص پارگی کاغذ عنوان کرده‌اند که با یافته‌های این پژوهش نیز مطابقت دارد [۳۴].

نتایج مرتبط از پژوهشگران دیگر نشان می‌دهد که استفاده از پوشش‌های نانوذره‌ای می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به پارگی کمک کند، به‌ویژه زمانی که این پوشش‌ها به‌صورت یکنواخت بر سطح الیاف قرار گیرند [۳۵]. مقادیر مصرف نانوذرات، ابعاد نانومتری آن‌ها و قابلیت آن‌ها در ایجاد فاصله فیزیکی بین میکروفیبریل‌های الیاف می‌تواند بر کاهش مقاومت به پارگی تأثیرگذار باشد. قرار گرفتن یک لایه پوشش بر روی الیاف می‌تواند باعث افزایش ضخامت آن‌ها و در نتیجه افزایش مقاومت به پارگی در بیشتر تیمارها شود.

طول و سطح پیوند بین الیاف از عوامل مهم مؤثر بر مقاومت به پارگی هستند [۳۶]. مقاومت به پارگی به‌طور مثبت از نقاط اتصال و شبکه‌های اطراف آن تأثیر می‌پذیرد.



شکل ۸- مقایسه میانگین شاخص مقاومت در برابر پاره شدن کاغذهای مختلف

نتیجه گیری

این پژوهش به بررسی تأثیر پوشش‌های نانوگرافن، فلورین و پروتئین زئین بر خواص مکانیکی و ممانعتی کاغذ چاپ و تحریر پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از این مواد می‌تواند به بهبود خواص کاغذ کمک کند، به‌ویژه در زمینه‌های جذب آب و مقاومت به پارگی و ترکیدن.

پوشش‌دهی با زئین و نانوگرافن باعث کاهش جذب آب و تخلخل کاغذ شده و به‌طور قابل‌توجهی خواص ممانعتی آن را بهبود بخشیده است.

بالاترین وزن و ضخامت مربوط به کاغذهای پوشش داده شده با فلورین است، در حالی که کمترین مقادیر به نمونه‌های پوشش داده شده با نانوگرافن و زئین تعلق دارد.

کاغذهای پوشش داده شده با نانوگرافن بالاترین مقادیر شاخص مقاومت در برابر ترکیدن و پاره شدن را

نشان می‌دهند، در حالی که کاغذهای پوشش داده شده با فلورین کمترین مقادیر را دارند.

با توجه به مزایای زیست‌محیطی و قابلیت بازیافت پروتئین زئین و نانوگرافن، این مواد می‌توانند جایگزین مناسبی برای پوشش‌های پلاستیکی باشند، هرچند نانوگرافن به‌عنوان یک ماده تجدیدپذیر محسوب نمی‌شود.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از زئین و نانوگرافن به‌عنوان پوشش‌های مؤثر می‌تواند به تولید کاغذهای با ویژگی‌های ممانعتی و مکانیکی بهتر کمک کند. این یافته‌ها نشان‌دهنده پتانسیل بالای این مواد در بهبود عملکرد کاغذهای تحریر است.

برای تحقیقات آینده، پیشنهاد می‌شود که مطالعه ریخت‌شناسی به عنوان یک جنبه مکمل در نظر گرفته شود تا درک بهتری از تأثیرات مواد بر ساختار و خواص کاغذ فراهم شود. همچنین، بررسی اقتصادی پروژه می‌تواند شامل تحلیل دقیق‌تری از هزینه‌ها و منافع بلندمدت استفاده از مواد جدید باشد.

منابع

[1] Adibi, A., Trinh, B. M., and Mekonnen, T. H. 2023. Recent progress in sustainable barrier paper coating for food packaging applications. Progress in Organic Coatings, 181, 107566.

[2] Sharif, N.U., Habibu, S., Wang, H., Veera Singham, G., Huang, H.K., Hu, C., Zeng, G.S. and Tay, G.S., 2025. Advancing renewable functional coatings: sustainable solutions for modern material challenges. Journal of Coatings Technology and Research, pp.1-27.

[3] Rastogi, V.K. and Samyn, P., 2015. Bio-based coatings for paper applications. Coatings, 5(4), pp.887-930.

[4] Fauzi, N.B.M., 2016. Characterisation of different brands of white a4 papers using microscopic and spectroscopic techniques.

[5] Bae, J. H., Hong, K. H., & Lamar, T. M. 2015. Effect of texture on color variation in inkjet-printed woven textiles. Color Research & Application, 40(3), 297-303.

[6] Liu, J., Bao, S. and Wang, X., 2022. Applications of graphene-based materials in sensors: A review. Micromachines, 13(2), p.184.

[7] Gadakh, D., Dashora, P. and Wadhankar, G., 2020. A review paper on graphene coated fibres. Graphene, 8(4), pp.53-74.

[8] Abiose Sumbo, H. and Victor, I.A., 2014. Comparison of chemical composition, functional properties and amino acids composition of quality protein maize and common maize (Zea may L). African Journal of Food Science and Technology, 5(3), pp.81-89.

[9] Corradini, E., Curti, P.S., Meniqueti, A.B., Martins, A.F., Rubira, A.F. and Muniz, E.C., 2014. Recent advances in food-packing, pharmaceutical and biomedical applications of zein and zein-based materials. International journal of molecular sciences, 15(12), pp.22438-22470.

[10] Lavoine, N., Desloges, I., Khelifi, B. and Bras, J., 2014. Impact of different coating processes of microfibrillated cellulose on the mechanical and barrier properties of paper. Journal of Materials Science, 49(7), pp.2879-2893.

[11] Holik, H. ed., 2006. Handbook of paper and board. John Wiley & Sons.

[12] Fukuda, S., Chaussy, D., Belgacem, M.N., Reverdy-Bruas, N. and Thielemans, W., 2013. Characterization of oil-proof papers containing new-type of fluorochemicals Part 1: Surface properties and printability. Applied surface science, 277, pp.57-66.

[13] Tressaud, A., Durand, E., Labrugère, C., Kharitonov, A.P. and Kharitonova, L.N., 2007. Modification of surface properties of carbon-based and polymeric materials through fluorination routes: From fundamental research to industrial applications. Journal of Fluorine Chemistry, 128(4), pp.378-391.

[14] Parris, N., Sykes, M., Dickey, L.C., Wiles, J.L., Urbanik, T.J. and Cooke, P.H., 2002. Recyclable zein-coated kraft paper and linerboard. Progress in paper recycling. Vol. 11, no. 3 (May 2002): Pages 24-29.

[15] Tihminlioglu, F., Atik, İ.D. and Özen, B., 2010. Water vapor and oxygen-barrier performance of corn–zein coated polypropylene films. Journal of Food Engineering, 96(3), pp.342-347.

[16] Nazarnezhad, N., Orand, M., Resalati, H. and Rezanezhad, S., 2022. The effect of corn zein coating on the strength and barrier properties of liner paper. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 13(2), pp.213-223.

[17] Ashfaq, J., Channa, I.A., Memon, A.G., Chandio, I.A., Chandio, A.D., Shar, M.A., Alsalhi, M.S. and Devanesan, S., 2023. Enhancement of thermal and gas barrier properties of graphene-based nanocomposite films. ACS omega, 8(44), pp.41054-41063.

[18] Chen, G., Xie, P., Li, Z., Qiao, Y., Yang, C., Zhou, Z. and Fei, G., 2025. Development of Fluorinated Acrylic Resin-Based Paper Additives for Simultaneous Strength Improvement and Water Resistance. Journal of Applied Polymer Science, p.e57734.

[19] Li, X.H., Xing, Y.G., Li, W.L., Jiang, Y.H. and Ding, Y.L., 2010. Antibacterial and physical properties of poly (vinyl chloride)-based film coated

with ZnO nanoparticles. Food Science and Technology International, 16(3), pp.225-232.

[20] Penney, D. J., Sullivan, J. H., & Worsley, D. A. (2007). Investigation into the effects of metallic coating thickness on the corrosion properties of Zn–Al alloy galvanising coatings. Corrosion science, 49(3), 1321-1339.

[21] Ebrahimpour Kasmani, J., & Samariha, A. (2025). Evaluation of the effect of coating with graphene, Zein-Fluorine on the physical properties and printability of white liner paper from Mazandaran Wood and Paper Factory. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 40(3), 280-296.

[22] Zeppa, C., Gouanvé, F. and Espuche, E., 2009. Effect of a plasticizer on the structure of biodegradable starch/clay nanocomposites: Thermal, water-sorption, and oxygen-barrier properties. Journal of Applied Polymer Science, 112(4), pp.2044-2056.

[23] Voon, H.C., Bhat, R., Easa, A.M., Liong, M.T. and Karim, A.A., 2012. Effect of addition of halloysite nanoclay and SiO2 nanoparticles on barrier and mechanical properties of bovine gelatin films. Food and Bioprocess Technology, 5(5), pp.1766-1774.

[24] Mohammadi, E., Rezanezhad, S. and Asadpour, G., 2021. Evaluation of Strength, Optical and Antibacterial Properties of Treated Papers by Chitosan and Nano Zinc Oxide. Iranian Journal of Wood and Paper Industries, 12(1), pp.145-162.

[25] McHUGH, T.H., Aujard, J.F. and Krochta, J.M., 1994. Plasticized whey protein edible films: water vapor permeability properties. Journal of food science, 59(2), pp.416-419.

[26] Hadilam, M.M., Afra, E., Ghasemian, A. and Yousefi, H., 2014. Preparation and properties of ground cellulose nanofibers. Journal of wood and forest science and technology, 20(2):139-149. (In Persian).

[27] Fendler, A., Villanueva, M.P., Gimenez, E. and Lagarón, J.M., 2007. Characterization of the barrier properties of composites of HDPE and purified cellulose fibers. Cellulose, 14(5):427-438.

[28] Ngo, Y.H., Li, D., Simon, G.P. and Garnier, G., 2011. Paper surfaces functionalized by nanoparticles. Advances in colloid and interface science, 163(1), pp.23-38.

[29] Morsy, F.A. and El-Sherbiny, S., 2004. Mechanical properties of coated paper: Influence of coating properties and pigment Blends. Journal of materials science, 39(24), pp.7327-7332.

[30] Han, J.H. and Krochta, J.M., 2001. Physical properties and oil absorption of whey-protein-coated paper. Journal of food science, 66(2), pp.294-299.

[31] Hagen, R. and Salmén, L., 1995. Influence of the interaction zone between coating and paper on the dynamic mechanical properties of a coated paper. Journal of materials science, 30(11), pp.2821-2828.

[32] Rouf, T.B., Schmidt, G., Cakmak, M. and Kokini, J.L., 2019. Design and mechanistic understanding of graphene oxide reinforced zein nanocomposites with improved mechanical, barrier and thermal properties. Journal of Materials Science, 54(19), pp.12533-12552.

[33] Liu, Y., Xie, B., Zhang, Z., Zheng, Q. and Xu, Z., 2012. Mechanical properties of graphene papers. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 60(4), pp.591-605.

[34] Kassem, N. and Nada, A.A.M., 2009. Mechanical properties of paper sheets treated with different polymers. Pigment & Resin Technology, 38(2), pp.91-95.

[35] Hassan, E.A., Hassan, M.L., Abou-Zeid, R.E. and El-Wakil, N.A., 2016. Novel nanofibrillated cellulose/chitosan nanoparticles nanocomposites films and their use for paper coating. Industrial Crops and Products, 93, pp.219-226.

[36] Afra, E., 2006. Properties of paper: An introduction, Aiij Publications, 392 p. (Translated In Persian).